



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS (DECAM)
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

CINDE BATISTA PEREIRA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DA DEPOSIÇÃO E DISPERSÃO
DE GOTAS EM PULVERIZAÇÕES COM ARP E PULVERIZADOR
TRATORIZADO**

MOSSORÓ - RN

2025

CINDE BATISTA PEREIRA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DA DEPOSIÇÃO E DISPERSÃO
DE GOTAS EM PULVERIZAÇÕES COM DRONE E PULVERIZADOR
TRATORIZADO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Suedêmio de Lima Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Moura da Silva

MOSSORÓ – RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P436a Pereira, Cinde Batista.
Avaliação comparativa da eficiência da deposição
e dispersão de gotas em pulverizações com ARP e
pulverizador tratorizado / Cinde Batista Pereira.
- 2025.
47 f. : il.

Orientador: Suedêmio de Lima Silva.
Coorientador: Paulo Cesar Moura Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2025.

1. ARP de pulverização. 2. Drone agrícola. 3.
Tecnologia de aplicação. 4. Pulverização terrestre.
I. Silva, Suedêmio de Lima , orient. II. Silva,
Paulo Cesar Moura, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CINDE BATISTA PEREIRA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DA DEPOSIÇÃO E DISPERSÃO
DE GOTAS EM PULVERIZAÇÕES COM DRONE E PULVERIZADOR
TRATORIZADO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Defendida em: 18/ 12/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Suedêmio de Lima Silva (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Paulo Cesar Moura da Silva (UFERSA)
Membro Examinador

Samara Nascimento de Lima Falcão, Eng. Agrícola e Ambiental (EXTERNO)
Membro Examinador

Jacinto Batista de Carvalho (In Memoriam).
Cristóvão Batista Pereira (In Memoriam).

“Dedico essa conquista, e cada passo da minha trajetória, ao meu bisavô, cuja presença nunca toquei, mas a essência sempre me alcançou por meio das histórias que o mantêm vivo e do amor que permanece aceso no meu coração e de todos nós. Dedico também ao meu irmão, parte viva e inseparável do meu coração e da minha própria história, cuja existência ilumina meus dias e fortalece meu caminho. Saudade eterna.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades que me foram concedidas.

Nos momentos em que me senti sem chão, Sua presença fortaleceu meu coração.

Aos meus pais, minha gratidão eterna. Vocês correram sob o sol para que eu pudesse caminhar na sombra, e cada conquista minha traz em si o esforço, o amor e os sonhos que vocês plantaram em meu caminho. Tudo o que alcanço também pertence a vocês, moldado pela força e pela esperança que sempre depositaram em mim.

À minha irmã e melhor amiga, agradeço por todo o amor que compartilhamos. É uma alegria imensa acompanhar o seu crescimento.

À minha família, meu lar e base, agradeço pelo ambiente amoroso em que nasci e cresci.

Ao meu namorado, agradeço pela parceria, paciência, amor e doçura dos dias partilhados.

Aos meus amigos — todos — deixo meu sincero agradecimento. Em especial, à Clara Ohana e à Samara Nascimento, colegas de curso e grandes conselheiras.

Ao meu orientador, agradeço por todo o tempo dedicado, pela orientação cuidadosa e pela paciência inesgotável.

À Banca Examinadora, agradeço pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições para este trabalho. Em especial, ao Prof. Dr. Paulo Cesar Moura da Silva, que sempre foi uma referência para mim e cuja presença neste trabalho eu desejei desde o início.

Agradeço à Universidade Agrícola da China (CAU) bem como à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e Agricultura Familiar (SEDRAF) pela parceria e disponibilização do ARP utilizado nas atividades experimentais, cuja colaboração foi fundamental para a realização desta pesquisa.

"O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você; ele nunca o deixará, nunca o abandonará. Não tenha medo! Não se desanime!"

Deuteronômio 31:8

RESUMO

A agricultura moderna incorporou tecnologias como aeronaves remotamente pilotadas (ARP) para aplicação de agroquímicos, que oferecem vantagens como acesso a áreas de difícil operação, redução de amassamento e maior segurança ao operador. A eficiência da pulverização depende de fatores operacionais, condições climáticas, tamanho das gotas e calibração dos equipamentos. Para a realização do experimento utilizou-se um drone XAG P100 Pro e um pulverizador tratorizado marca Jacto modelo Condorito. Na ARP avaliaram-se duas alturas (3 e 5 m), duas velocidades (5 e 10 m/s) e volumes de 20 e 40 L.ha⁻¹. Papeis hidrossensíveis foram fixados em piquetes de madeira. Utilizou-se o software Gotas® para determinar número de gotas, densidade, cobertura, fator de dispersão, DMV e volume de calda. Para o pulverizador tratorizado foram utilizadas duas velocidades e volumes de 120 e 250 L.ha⁻¹. Os dados foram submetidos à ANOVA e teste de Tukey. Na pulverização aérea, a altura influenciou todas as variáveis, sendo que menores alturas resultaram em maior densidade e cobertura, enquanto maiores alturas aumentaram a deriva e reduziram a deposição. A velocidade afetou principalmente a dispersão das gotas. Na comparação entre os sistemas, o pulverizador tratorizado apresentou maior número de gotas depositadas, maior densidade, maior percentual de cobertura e maior volume aplicado. A ARP, operando em baixa vazão, apresentou menor deposição, porém gerou espectro de gotas mais uniforme (dispersão 0,77), menor variação do DMV entre tratamentos e maior regularidade na distribuição das gotas, além de não causar amassamento, operar com precisão em faixas estreitas e manter maior estabilidade quanto à uniformidade mesmo sob diferentes condições de altura e velocidade. Conclui-se que, embora o pulverizador tratorizado apresente maior deposição total, a ARP demonstrou desempenho superior em uniformidade do espectro de gotas, padronização da aplicação, regularidade do DMV e capacidade operacional em condições onde o trator é limitado, reforçando seu potencial como tecnologia eficiente para aplicações de baixa vazão e alta precisão.

Palavras-chave: ARP de pulverização, Drone agrícola, Tecnologia de aplicação, Pulverização terrestre.

ABSTRACT

Modern agriculture has increasingly adopted remotely piloted aircraft (RPA) for agrochemical application due to advantages such as access to areas with difficult terrain, reduced crop trampling, and improved operator safety. This study evaluated the performance of an RPA (XAG P100 Pro) and a tractor-mounted sprayer (Jacto Condorito) under controlled field conditions. For the RPA, two flight heights (3 and 5 m), two speeds (5 and 10 m/s), and spray volumes of 20 and 40 L ha⁻¹ were assessed, while the tractor-mounted sprayer was tested with two speeds and spray volumes of 120 and 250 L ha⁻¹. Hydrosensitive papers were installed in the field, and deposition characteristics were analyzed using Gotas® software to determine droplet number, density, coverage, dispersion factor, DMV, and spray volume. Data were analyzed using ANOVA followed by Tukey's test. Flight height significantly influenced all aerial application variables, with lower heights providing greater droplet density and coverage, while higher heights increased drift. Spray speed mainly affected droplet dispersion. The tractor-mounted sprayer produced higher droplet number, density, coverage, and spray volume. In contrast, the RPA, despite applying lower spray volumes, generated a more uniform droplet spectrum (dispersion 0.77), lower DMV variation among treatments, and greater consistency in droplet distribution, in addition to operational advantages such as precision in narrow strips and elimination of crop trampling. Overall, although the tractor-mounted sprayer achieved greater total deposition, the RPA demonstrated superior uniformity, droplet spectrum stability, and operational efficiency under conditions where ground equipment is limited, highlighting its potential for low-volume and high-precision crop protection applications.

Keywords: Spraying RPA, Agricultural Drone, Application Technology, Ground spraying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Drone da marca XAG modelo P100 Pro usado no experimento.	21
Figura 2. Ponta de pulverização rotativa.	21
Figura 3. Papel hidrossensível.	22
Figura 4. Papel hidrossensível a uma altura de 35cm do solo.	23
Figura 5. Papel hidrossensível a uma altura de 35cm do solo.	23
Figura 6. Painel de monitoramento da estação meteorológica.	25
Figura 7. Estação meteorológica.	25
Figura 8. Trator JD 6110J.	26
Figura 9. Pulverizador de barra Jacto modelo Condorito.	26
Figura 10. Exemplo de amostra analisada no software gotas.	28
Figura 11. Temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento durante os ensaios	29
Figura 12. Tabela Delta T para tomada de decisão para aplicação de agroquímicos.	29
Figura 13. Teste de Tukey para fator de dispersão das gotas em função dos tratamentos	31
Figura 14. Volume de calda aplicado em função da velocidade de e altura de voo e volume de calda programado.	33
Figura 15. Teste de Tukey para densidade de gotas em função dos tratamentos	34
Figura 16. Teste de Tukey para percentual de cobertura em função dos tratamentos.	35
Figura 17. Teste de Tukey para o diâmetro médio volumétrico em função dos tratamentos.	36
Figura 18. Teste de Tukey para o número de gotas em função do equipamento utilizado	37
Figura 19. Teste de Tukey para a variável dispersão na aplicação com ARP e pulverizador tratorizado.	37
Figura 20. Teste de Tukey para a dispersão de gotas em função do equipamento utilizado.	38
Figura 21. Teste de Tukey para a dispersão de gotas nos equipamentos utilizados.	39
Figura 22. Teste de Tukey para a densidade de gotas gerado pelos equipamentos utilizados.	40
Figura 23. Teste de Tukey para a densidade de gotas para os tratamentos utilizados.	40
Figura 24. Teste de Tukey para a percentual de cobertura para os tratamentos utilizados	41
Figura 25. Teste de Tukey para o DMV gerado pelos equipamentos utilizados.	41
Figura 26. Teste de Tukey para o DMV para os tratamentos utilizados	42

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Local de realização do experimento	20
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos tratamentos realizados.....	24
Tabela 2. Análise de variância para os fatores de variação dispersão, volume de calda, densidade, cobertura e diâmetro médio volumétrico (DMV).	30
Tabela 3. Teste de média para a variável dispersão em função dos tratamentos para aplicação aérea	31
Tabela 4. Teste de média para a velocidade e altura de voo	32
Tabela 5. Teste de Tukey para a variável volume de calda aplicado	32
Tabela 6. Análise do desdobramento de velocidade dentro de cada nível de volume de calda e altura de voo.....	32
Tabela 7. Análise do desdobramento da velocidade de voo e volume de calda aplicado para a variável volume de calda programado.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Desafios na implementação	16
2.2 Aplicação de agroquímicos com drone	16
2.3 Pulverização terrestre	17
2.4 Parâmetros ideais para pulverização.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Condições climáticas	29
4.2 Aplicação aérea.....	29
4.2.1 Dispersão.....	30
4.2.2 Volume de calda.....	32
4.2.3 Densidade de gotas.....	33
4.2.4 Percentual de cobertura	34
4.2.5 Diâmetro médio volumétrico (DMV)	35
4.3 Comparação drone e pulverizador tratorizado	36
4.3.1 Número de gotas	36
4.3.2 Fator de dispersão	37
4.3.3 Volume de calda aplicado	38
4.3.4 Densidade de gotas e percentual de cobertura	39
4.3.5 Diâmetro médio volumétrico	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

1. INTRODUÇÃO

No início do século XX a agricultura brasileira era voltada para uma agricultura de subsistência, baseada na tração humana ou animal, com baixos índices tecnológicos e de produtividade, período esse conhecido com agricultura 1.0. A partir de 1950 deu-se início mundialmente ao processo denominado por revolução verde que consistia de novos métodos de cultivo, avanço na ciência no campo e a chegada da mecanização para impulsionar a produção de alimentos, sendo conhecida como agricultura 2.0.

A produção de grãos desempenha um papel significativo no setor agrícola que está em constante evolução para atender a demanda de produção necessária para alimentar toda a população, se encontrando na chamada era da Agricultura 5.0, caracterizada pela utilização de ferramentas digitais a partir de conexões móveis rápidas, inteligência artificial, automação da aplicação de insumos e dados para orientar as tomadas de decisões, buscando otimizar a produtividade da agricultura, seguindo diretrizes sustentáveis e renováveis, além de aumentar a produtividade e a sustentabilidade.

A tecnologia de aplicação consiste da aplicação de um agroquímico por equipamentos terrestres, podendo ser com o uso de bombas costais, pulverizadores tratorizado, autopropelidos, e a aplicação aérea utilizando aviões agrícolas, helicópteros e, mais recentemente com uso de drones, mais conhecidos como Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). A utilização de ARP para a pulverização visa o controle eficaz e sustentável de patógenos e plantas daninhas de cultivos agrícolas tendo como benefícios a reduzir os custos operacionais, otimizar as operações de pulverização em áreas declivosas ou aplicações localizadas, reduzindo perdas por amassamento da cultura e minimizando contato do operador com os agroquímicos.

Para alcançar maior produtividade e redução nos custos de produção, um fator indispensável é o uso de agroquímicos, que irá proporcionar a sanidade e a saúde das culturas, principalmente quando cultivadas em grandes áreas. O manuseio desses produtos envolve um conjunto de procedimentos e cuidados, respaldados por normas e leis que garantem a segurança do trabalhador, a saúde do consumidor e o equilíbrio ambiental.

Observa-se que o setor agrícola tem adotado novas alternativas tecnológicas, incluindo o uso de ARP. A eficácia do uso dos agroquímicos no controle dos patógenos e plantas invasoras está associado a fatores como a tipo de aplicação (terrestre ou aérea), forma de ação do produto (contato ou sistêmico), escolha adequada do equipamento, estado de funcionamento, pontas de pulverização, tamanho de gota, condições meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento), sendo indispensável a calibração do equipamento.

A pulverização aérea com drone tem ganhado destaque e aumentado significativamente em todas as etapas da cadeia produtiva devido à utilização eficiência nas culturas para aplicação de agroquímicos, sensoriamiento agrícola, auxiliando na construção de mapas, identificação de doenças, pragas, plantas invasoras, déficit hídrico, deficiência nutricional apresentando como vantagens, a possibilidade de entrada na lavoura em condições de solo na capacidade de campo e nos diferentes estágios de desenvolvimento das culturas sem causar amassamento.

O objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade da pulverização comparando a aplicação realizada com aeronave remotamente pilotada (ARP) e pulverizador tratorizado, analisando, no ARP, os efeitos da variação da velocidade de deslocamento, altura de voo e volume de calda, e, no pulverizador tratorizado, os efeitos da variação da velocidade de deslocamento e do volume de calda, sobre os parâmetros número de gotas, dispersão, volume de calda aplicado, densidade de gotas, cobertura e diâmetro médio volumétrico (DMV).

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Desafios na implementação

Embora o uso de drones tenha um crescimento considerável, os principais desafios ainda são relacionados a custo-benefício, conhecimento técnico e regulamentações.

Conforme o REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL RBAC-E Nº 94 EMENDA Nº 03, todos os drones utilizados para pulverização devem ser registrados na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), além disso, o drone precisa ser homologado pela ANATEL, incluindo a autorização do uso do espaço aéreo pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo DECEA (ANAC, 2024).

O usuário deve sempre atentar que não basta cumprir as regras da ANAC para poder operar, mas é preciso cumprir também as regras do DECEA, da ANATEL e eventualmente de outras autoridades competentes, que podem criar restrições ou proibições operacionais além das regras da ANAC (ANAC, 2024).

Além do cadastro no Mapa que passará a ser realizado automaticamente pelo Sipeagro os operadores deverão ter formação específica como aplicadores aeroagrícolas remotos. Também será exigida a presença de um responsável técnico, como um engenheiro agrônomo ou florestal, para acompanhar e orientar as operações. Quanto às aeronaves, elas precisam estar regularizadas e autorizadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) antes de serem utilizadas. (NACIONAL, [s.d.]

2.2 Aplicação de agroquímicos com drone

A legislação que disciplina a atividade, basicamente, é o RBAC-E-94 da Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC (ANAC, 2021) e a Portaria 298 do Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA (DIÁRIO, 2021). Cabe registrar que esta Portaria assegura a equivalência entre aplicações com aeronaves tripuladas e drones, principalmente quanto às recomendações de bula dos agrotóxicos.

Os drones agrícolas são classificados pela ANAC em três classes: Classe 1, com peso máximo na decolagem superior a 150 kg; Classe 2, com peso entre 25 e 150 kg; Classe 3, de 250g até 25 kg. As exigências para operar drones classe 3 são mais simples, acessíveis ao setor do agronegócio.

O Ministério da Agricultura, através da Portaria 298, define a obrigatoriedade do Curso de Aplicador Agrícola Remoto - CAAR, com duração de 24 horas de aulas teóricas, destinado aos auxiliares de piloto. Várias entidades de ensino, como a Schroder Consultoria Agro, estão registradas no MAPA para oferecer o curso (DIÁRIO, 2021).

A utilização de drones no setor agrícola vem crescendo constantemente nos últimos anos, essas aeronaves conhecidas como RPAs (Aeronaves Remotamente Pilotadas) oferecem diversas aplicabilidades que contribuem positivamente com o setor. Segundo dados oficiais do Sistema de Aeronaves Não-Tripuladas (Sisant), órgão vinculado à Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), existem hoje 5.269 drones agrícolas em operação no país. O número é 375% maior do que no ano de 2022, quando a frota contava com 1.109 unidades (Franco, 2024).

Analisando a eficiência da deposição de calda em plantas de soja utilizando drone em diferentes volumes e velocidades de aplicação, em relação ao pulverizador terrestre

autopropelido Sandmann et al (2025) obteve resultados que mostraram que a pulverização terrestre apresentou maior densidade de gotas em todas as posições avaliadas. Contudo, a aplicação aérea demonstrou maior cobertura em condições específicas (11 L ha^{-1} a 15 km h^{-1}), especialmente no terço superior. Em síntese, a pulverização terrestre foi mais eficiente na deposição de gotas, mas os drones mostraram potencial como ferramenta complementar, sobretudo pela precisão operacional e sustentabilidade.

A compreensão de fatores como altura, velocidade e deposição das gotas na pulverização com drones é crucial para a eficiência do processo. Em aplicações de baixa vazão, torna-se indispensável focar na efetividade da operação, frequentemente avaliada pela cobertura do alvo atingido (Cunha e Silva, 2023). Para aumentar a cobertura, é necessário reduzir o tamanho das gotas; no entanto, isso as torna mais suscetíveis à deriva (Mewes et al., 2013).

Avaliando a deposição de calda em diferentes locais da planta de soja utilizando drone em diferentes volumes e velocidades de aplicação relacionando com aplicação terrestre com pulverizador de barras. Pereira (2023) observou que a densidade de gotas na aplicação terrestre é maior em todas as posições entre todas as velocidades da aplicação aérea. A posição superior tem a maior densidade entre todas as velocidades do drone e do autopropelido.

De acordo com Ruppenthal (2024) a eficiência da deposição de gotas proporcionada por drone pulverizador em diferentes posições na planta, altura de voo e taxa de aplicação em litros por hectare na cultura do milho (*Zea mays*). O maior valor de área de cobertura foi verificado para o volume de calda de 15 L ha^{-1} com a menor altura de voo (4,0 m), já o valor mais baixo foi observado para o menor volume de calda aplicado 10 L ha^{-1} na maior altura (6,0m).

2.3 Pulverização terrestre

O pulverizador de barras é usado principalmente para aplicações em área total e pode ter a barra montada na traseira, ou frente do equipamento, dependendo da cultura. Barras de até 12 m são fixas; acima desse tamanho possuem sistemas de estabilização e amortecimento para reduzir oscilações e manter paralelismo com o solo, muitas vezes com correção hidráulica e ajuste eletrônico de altura (nos modelos mais sofisticados) (ANDEF, 2013).

Pulverizar significa distribuir uma substância líquida em pequenas partículas. Em agricultura, a pulverização geralmente é utilizada para distribuir produtos agroquímicos, nutrientes ou fertilizantes de uma maneira geral. Ela pode ser feita por terra ou por via aérea, sendo essa última mais comum nas propriedades de grande extensão. De qualquer maneira, os pulverizadores são utilizados para garantir que o produto seja distribuído em quantidade correta e nos locais desejados. (JACTO, 2017)

Portanto, um pulverizador agrícola é um equipamento que auxilia no combate a pragas, doenças, insetos ou diversas outras ameaças. Ele também pode ajudar na distribuição de fertilizantes e, por isso, é uma das principais ferramentas de trabalho no campo. (JACTO, 2017)

Existem diversos fatores relacionados aos pulverizadores tratorizados: a velocidade, o tamanho da barra, o tempo de manobra, a capacidade do reservatório de calda, o tempo de reabastecimento e a distância percorrida. Esses fatores determinam a eficiência operacional do

trabalho do implemento (Farias et al., 2015). Além desses fatores, a altura da barra, o ângulo de projeção dos jatos de bicos, o espaçamento entre pontas e a pressão de trabalho da pulverização podem favorecer na deriva e na distribuição desuniforme da calda (Rocha et al., 2023). Para se obter uma melhor qualidade na aplicação de defensivos, há necessidade de ser reunida a quantidade máxima de dados sobre quatro fatores implicados no processo de pulverização: máquina agrícola, alvo biológico, fatores climáticos regionais e agrotóxicos a serem utilizados (Schlosser, 2002)

A velocidade de trabalho do pulverizador apresenta grande influência na qualidade da pulverização agrícola, especialmente quando são utilizadas gotas finas ou em condições climáticas inadequadas para a aplicação dos produtos fitossanitários (Hilz & Vermeer, 2013). O aumento da velocidade de deslocamento dos pulverizadores pode ocasionar alterações nas condições operacionais do implemento, como, por exemplo, uma influência negativa sobre os níveis de depósitos de gotas e no aumento das perdas de deriva associadas a gotículas médias e finas. Esses fatores podem resultar em uma menor eficiência do tratamento fitossanitário e no aumento do impacto ambiental (Heidary et al., 2014),

Segundo Jesus (2016) pequenas variações na velocidade de deslocamento do equipamento de pulverização e o tipo de jato produzido pela ponta não interferem na porcentagem de cobertura das gotas pulverizadas. A velocidade de deslocamento do equipamento de pulverização afeta a eficiência de controle de *Chrysodeixis includens* dependendo do tipo de ponta utilizada na pulverização.

A modificação na velocidade de deslocamento do pulverizador interfere significativamente na aplicação de produtos fitossanitários, pois age diretamente sobre as gotas aplicadas no alvo desejado, influenciando gravemente na deposição dos agroquímicos Boller (2011). Logo, mediante avaliações do espectro de gotas, é possível analisar a população de gotas da pulverização, levando em consideração parâmetros como: pressão de trabalho, volume de calda, tipo de defensivo e misturas no tanque (Antuniassi et al., 2017).

Na avaliação da velocidade de deslocamento (Dierings, 2020) concluiu que a velocidade de 15 km/h foi a mais recomendada para ambos os pulverizadores, por proporcionar melhor cobertura do alvo, devido ao maior número de gotas e melhor uniformização de aplicação.

Moniz (2020) avaliou a interação entre os formatos dos jatos de pulverização, com espectro de gotas similares e volumes de calda na cobertura nas folhas de soja, determinou que o aumento do volume de calda de 100 para 200 L ha⁻¹ aumentou a cobertura do alvo, para ambos os extratos analisados.

Sendo assim, a inconsistência da velocidade de deslocamento do pulverizador devido à topografia irregular da localidade, como as curvas-de-nível, juntamente com o processo de alta e baixa velocidade durante o momento de pulverização, causam variações significativas a variação no espectro de gotas gerado pelo implemento para manter constante o volume ou a dose recomendada (Peres, 2014).

A depender da topografia da área escolhida, quanto maior a velocidade de trabalho do pulverizador, maior a favorabilidade a oscilações verticais e horizontais da barra dos pulverizadores terrestres (Liu et al., 2006; Nuyttens et al., 2007).

Com a alternância da velocidade de pulverização, o implemento pode produzir gotas muito grossas, onde estas não irão fazer uma boa cobertura da superfície desejada, tampouco

boa uniformidade de distribuição e deposição. No caso de gotas muito finas, se obtém boa cobertura superficial e uniformidade de distribuição de calda, no entanto, essas gotas podem evaporar em condições de baixa umidade relativa ou serem levadas pela corrente de ar (Benassi et al., 2020).

Avaliando a deposição de calda em diferentes locais da planta de soja utilizando um drone e um autopropelido para fins de comparação, considerando-se os volumes de 70, 110 e 150 L ha⁻¹, Pereira (2023) observou que a densidade de gotas na aplicação terrestre é maior em todas as posições entre todas as velocidades da aplicação aérea a posição superior tem a maior densidade entre todas as velocidades do drone e do autopropelido, e a aplicação terrestre obteve melhor eficiência na deposição de gotas em relação a aplicação com drone.

2.4 Parâmetros ideais para pulverização

A dose é a quantidade de ingrediente biologicamente ativo aplicada por área, expressa em gramas ou litros por hectare, e deve ser calculada por profissional capacitado. O volume de aplicação corresponde à quantidade de calda aplicada por área e depende de fatores como tipo de alvo, bico, clima, planta e produto. A cobertura refere-se à quantidade de gotas depositadas sobre o alvo, sendo determinada pelo tipo de produto, tamanho da gota, arquitetura da planta e densidade das folhas. O tamanho das gotas, medido em micrômetros, influencia a pulverização e é definido pelo modo de ação do produto, condições climáticas e situação do alvo. A pressão do sistema determina vazão e tamanho da gota, devendo ser regulada conforme manômetro e recomendações técnicas (JACTO, 2017).

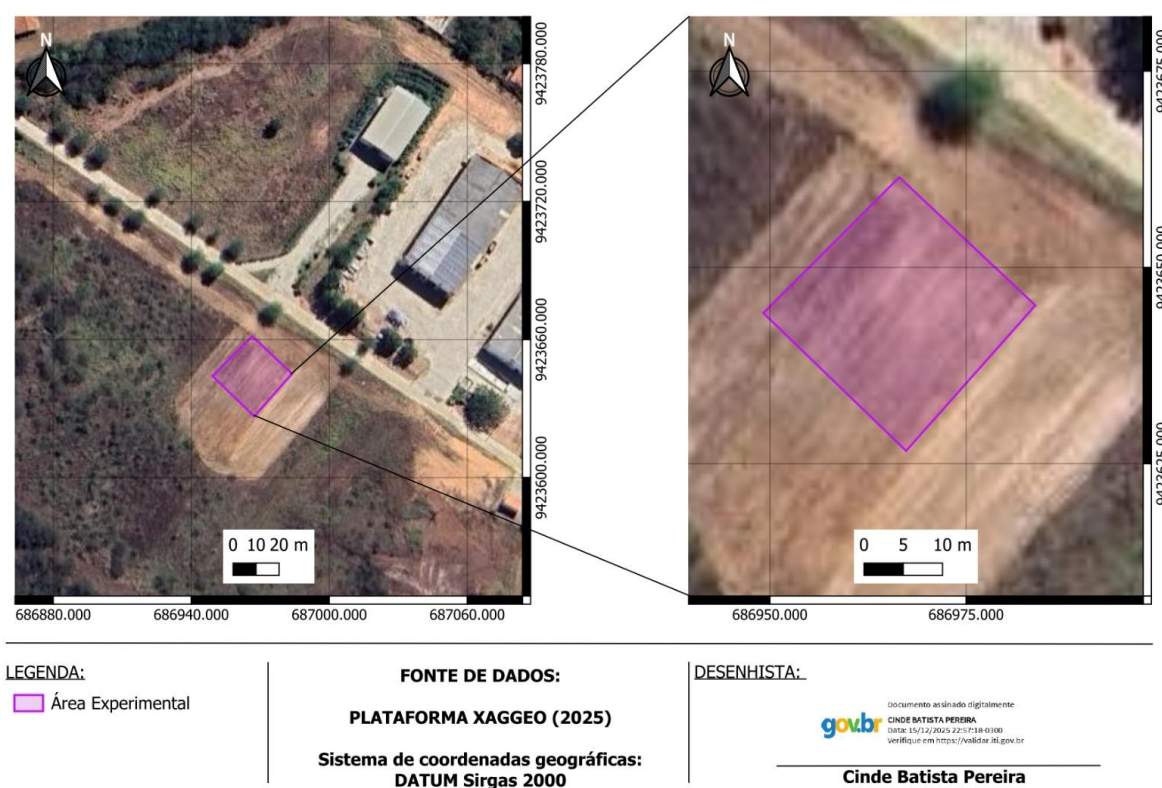
Já o vento, temperatura e umidade relativa influenciam a pulverização, que deve ocorrer com vento menor que 10 km/h, temperatura abaixo de 30°C e umidade relativa superior a 55%, podendo ajustar o tamanho das gotas quando essas condições não são ideais. A deriva é o movimento do produto para fora do alvo, influenciada por vento, temperatura, umidade e tamanho das gotas, devendo ser minimizada com observação das condições. Os bicos ou pontas de pulverização são acessórios fundamentais e variáveis importantes no processo de pulverização (JACTO, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Mossoró, em uma área de 0.06ha (Mapa 1). A posição geográfica corresponde a 9423649.52 m S de Latitude Sul e 686972.09 m E de Longitude Oeste, com altitude média de 31 metros e declividade menor que 2%. O clima (BSwh') é seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono com temperatura média anual de 27,4°C, precipitação pluviométrica anual de 673,9 mm e umidade relativa do ar de 68,9% no outono (Pereira et al., 2011).

Mapa 1. Local de realização do experimento

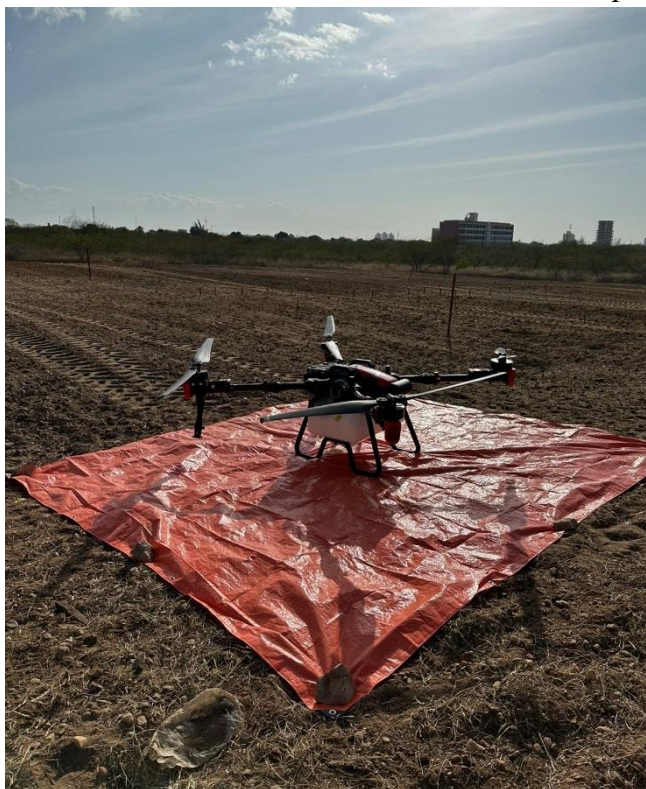
MAPA DA ÁREA EXPERIMENTAL:



Fonte: Autor (2025)

Para a pulverização aérea foi utilizado um drone agrícola da marca XAG, modelo P100 Pro (Figura 1), com capacidade de carga de 50 litros para líquidos e 80 litros para sólidos, composto por sistemas de pontas rotativas (Figura 2), com ajuste de tamanho de gota pelo aplicativo XAG One (60-400µm).

Figura 1. Drone da marca XAG modelo P100 Pro usado no experimento.



Fonte: Autor (2025)

Figura 2. Ponta de pulverização rotativa.



Fonte: Autor (2025)

Os voos foram realizados com duas alturas, sendo elas 3,0m e 5,0m, em cada altura foram realizados voos com duas velocidades diferentes (5 e 10 m/s), além de variar também a

taxa de aplicação entre 20 e 40 L/ha, esses parâmetros foram configurados no aplicativo XAG One, entre outros parâmetros, foi utilizado apenas uma faixa de aplicação (largura de 10 m) para as diferentes alturas, vazão e velocidade.

Para simular uma aplicação real e não acarrear nenhum dado ou contaminação, foi utilizado apenas água nas aplicações.

Para avaliar a aplicação utilizou-se papéis sensíveis a água, tamanho 26 x 76 mm (Figura 3), esses papéis são cartões amarelos que contém uma camada de bromofenol, que apresenta coloração azul quando entra em contato com algum líquido, permitindo identificação de volume pulverizado, quantidade e tamanho de gotas sobre o papel.

Figura 3. Papel hidrossensível.



Fonte: Autor (2025)

Os cartões foram instalados em piquetes de madeira a uma altura de 35cm do solo (Figuras 4 e 5), foram colocados em linha, sendo um piquete central em uma largura de 20m com espaçamento de 1,5m para a direita e 1,5m para esquerda, e os demais piquetes com espaçamento de 1m, sendo os dois últimos de ambos os lados o espaçamento de 50cm.

Figura 4. Papel hidrossensível a uma altura de 35cm do solo.



Fonte: Autor (2025)

Figura 5. Papel hidrossensível a uma altura de 35cm do solo.



Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 1 estão descritos os tratamentos da pulverização terrestre (T1 a T4) e aérea (T5 a T12).

Tabela 1. Descrição dos tratamentos realizados.

Tratamentos	Descrição	Valores
T1	V1-C1	V1= 4,3km/h P1= 40psi
T2	V2-C1	V2= 8,3km/h P1= 40psi
T3	V1-C2	V1= 4,3km/h P2= 60psi
T4	V2-C2	V2= 8,3km/h P2= 60 psi
T5	V1H1C1	V1= 5 m/s H1= 3,0 m C1= 40l/ha
T6	V1H1C2	V1= 5 m/s H1= 3,0 m C2= 20l/ha
T7	V1H2C1	V1= 5 m/s H2= 5,0m C1= 40l/ha
T8	V1H2C2	V1= 5 m/s H2= 5,0m C2= 20l/ha
T9	V2H1C1	V2= 10m/s H1= 3,0 m C1= 40l/ha
T10	V2H1C2	V2= 10m/s H1= 3,0 m C2= 20l/ha
T11	V2H2C1	V2= 10m/s H2= 5,0m C1= 40l/ha
T12	V2H2C2	V2= 10m/s H2= 5,0m C2= 20l/ha

Onde: V para trator – Velocidade – C/P – pressão das pontas do pulverizador. Para drone V – Velocidade – H – altura de voo – C- vazão. Fonte: Autor (2025).

Durante o experimento as condições meteorológicas foram monitoradas com uma estação marca Instrutemp modelo ITWH-1080 (Figura 6 e 7), com objetivo de realizar as aplicações em condições adequadas. A estação monitorou e gravou os dados de temperatura do ar (T), velocidade do vento (VV) e umidade relativa (UR).

Figura 6. Painel de monitoramento da estação meteorológica.



Fonte: Autor (2025).

Figura 7. Estação meteorológica.



Fonte: Google (2025)

Para a aplicação tratorizada, foi utilizado um trator JD 6110J , (Figura 8) um pulverizador de barra Jacto, modelo Condorito (figura 9) com 9m de barra e 400 L de capacidade de calda, equipado com pontas leque modelo ADI 11002.

Figura 8. Trator JD 6110J.



Fonte: John Deere (2025)

Figura 9. Pulverizador de barra Jacto modelo Condorito.



Fonte: Jacto (2025)

Em cada voo do drone, nas alturas e velocidades avaliadas, foram colocados os papéis hidrossensíveis, a partir dos quais, foram avaliados o número de gotas que atingiram o alvo, diâmetro médio das gotas, percentual de cobertura, densidade de gotas (número de gotas por cm^2), diâmetro volumétrico D10, diâmetro volumétrico D50 ou DMV) e o diâmetro volumétrico D90.

Número de gotas encontrado na amostra: essa informação refere-se ao número total de gotas encontrado em toda a superfície da amostra. Essa informação é importante para o usuário, quando desejar maior confiabilidade nos quesitos relacionados aos tamanhos das gotas, pois, quanto maior o número de gotas da amostra, mais confiável é o resultado da análise (Chaim et al., 2000)

A densidade de gotas representa quantas gotas atingiram uma área equivalente a um centímetro quadrado. Sendo um parâmetro internacionalmente indicado para a calibração da pulverização, pois os fabricantes, de defensivos agrícolas, indicam a densidade de gotas para o controle de determinada praga. Um exemplo é para o controle de plantas espontâneas, com utilização de herbicida pré emergente sistêmico, a densidade de gotas é de 20 a 30 gotas. cm^{-2} ,

já para utilização de herbicida pré-emergente de contato, a densidade de gotas é de 30 a 40 gotas.cm⁻² (Chaim et al., 2000)

Diâmetro volumétrico D50 (µm). Representa a distribuição dos diâmetros das gotas de maneira tal que os diâmetros menores que D50 compõem 50% do volume total de líquido da amostra. Esse parâmetro também é conhecido como diâmetro mediano volumétrico internacionalmente conhecido como VMD e é muito importante para a calibração da deposição, pois expressa o padrão de diâmetro de gotas que atingiu a amostra (Chaim et al., 2000).

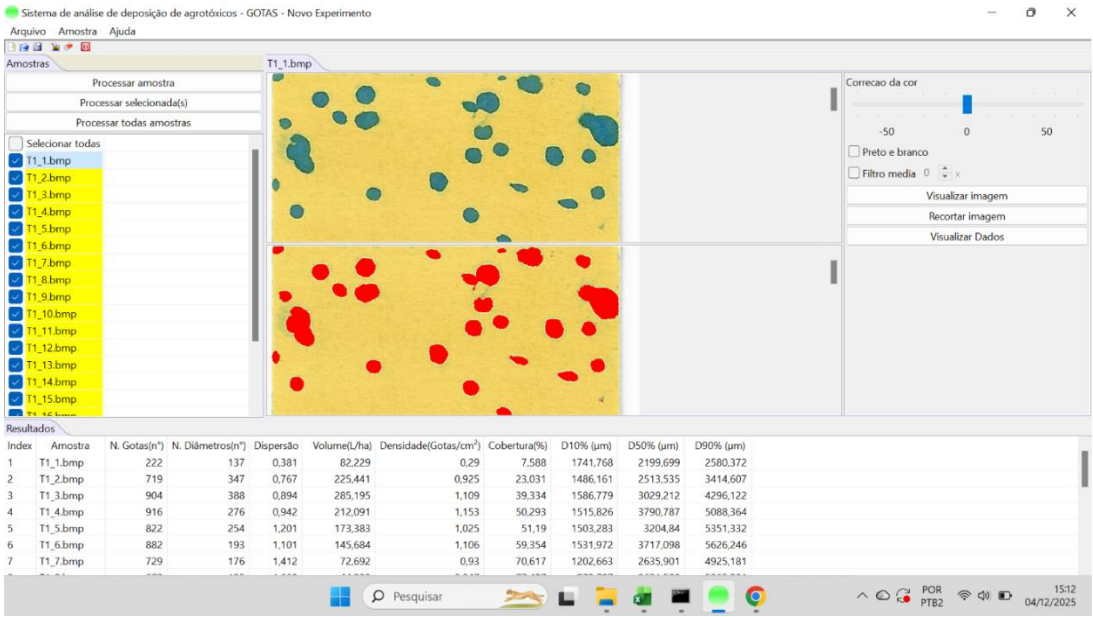
Utilizou-se o software Run Gotas, desenvolvido pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) desenvolvido para assessorar os agricultores a adquirirem os parâmetros convenientes de deposição de agrotóxicos nos alvos desejados. Esse programa está disponível para download gratuito no Portal da Embrapa (Chaim et al., 2006).

Os cartões devem ser digitalizados em aparelho escâner, capaz de adquirir imagens com resolução óptica de 600 dpi. (dpi ou ppi = "pontos de por polegada"). Uma polegada² contem 645160000 µm² e assim na resolução óptica de 600 dpi, (360000 pixels por pol²), um pixel apresenta uma área de 1792,11 µm² ou como um pequeno quadrado com 42,33 µm de largura (Chaim et al., 2006).

O programa Gotas apresenta os seguintes parâmetros de deposição: número de gotas, número de diâmetros de gotas, fator de dispersão de tamanho de gotas, volume de calda na amostra (l/ha), densidade de gotas, diâmetro volumétrico Dv10, diâmetro volumétrico Dv50, diâmetro volumétrico Dv90 e porcentagem de cobertura (Chaim et al., 2006).

Os valores obtidos foram submetidos ao teste de normalidade e à análise de variância ($p \leq 0,05$). Em caso de significância, as médias foram analisadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando o software Sisvar, versão 5.3 (Ferreira, 2019).

Figura 10. Exemplo de amostra analisada no software gotas.



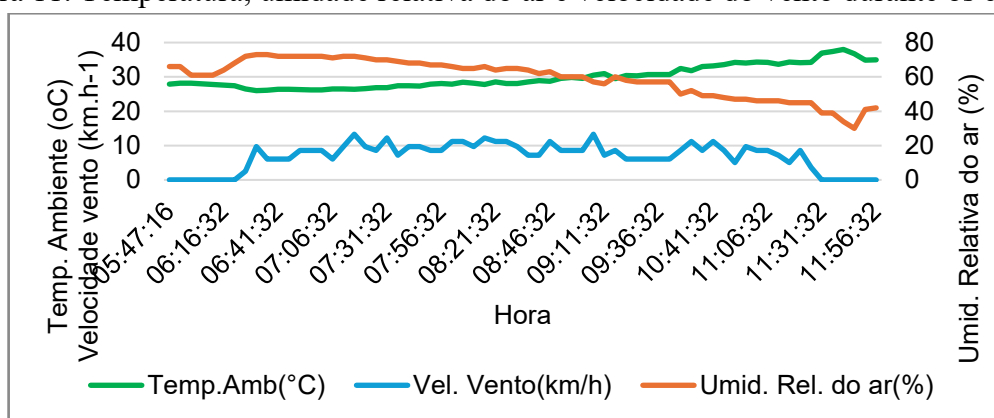
Fonte: Autor (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições climáticas

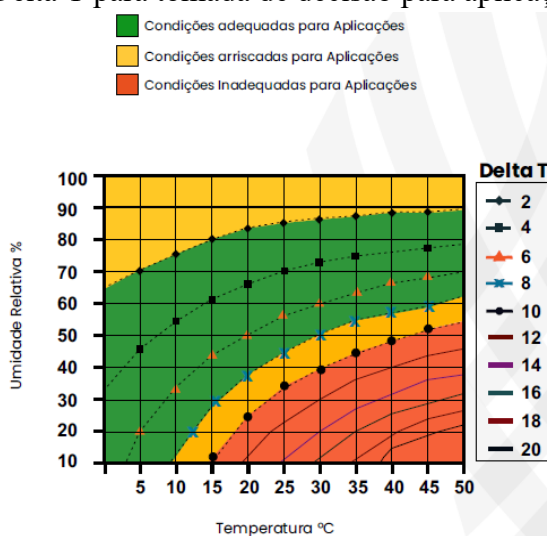
As condições climáticas, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento, no momento dos ensaios de pulverização aérea e terrestre são apresentados na Figura 11. Durante o experimento a temperatura ambiente variou entre 26 e 38°, a umidade relativa do ar entre 30 e 70% e a velocidade do vento entre 0 e 13,3 km.h⁻¹. De acordo com a tabela do Delta T (Figura 12), estando dentro da faixa verde, o que significa melhores condições de aplicação até as 09:00h. Observou-se que a partir de 09:00 horas a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar ficaram fora das faixas recomendadas para a realização da operação de pulverização, enquanto a velocidade do vento ficou alternando para valores dentro e fora do recomendado (JACTO 2017) como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11. Temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento durante os ensaios



Fonte: Autor (2025)

Figura 12. Tabela Delta T para tomada de decisão para aplicação de agroquímicos



4.2 Aplicação aérea

Com base nos resultados obtidas a partir da análise de variância dos fatores examinados (Tabela 2), observou-se interações significativas entre os três fatores de variação

(velocidade, altura e volume de calda) nas variáveis volume de calda aplicado, densidade de gotas, percentual de cobertura e diâmetro médio volumétrico. O mesmo ocorre nas interações envolvendo dois fatores (velocidade de voo x volume de calda e volume de calda x altura). Entretanto, a variável dispersão não apresentou interações significativas. Além disso, a interação entre os fatores velocidade de voo x altura não demonstrou significância para todas as variáveis analisadas

Ao avaliarmos as variáveis isoladamente, notamos que apenas a altura de voo apresentou diferenças significativas em relação a todas as variáveis analisadas. A velocidade de voo revelou diferenças significativas apenas para a variável dispersão, enquanto o volume de calda aplicado não apresentou significância, exceto para essa mesma variável.

Tabela 2. Análise de variância para os fatores de variação dispersão, volume de calda, densidade, cobertura e diâmetro médio volumétrico (DMV).

Fator de variação	Dispersão	Calda	Densidade	Cobertura	DMV
Velocidade (V)	6,34*	0,20	1,33	0,06	1,38
Calda (C)	1,27	39,53*	15,08*	37,90*	2,96
Altura voo (H)	17,86*	231,38*	193,95*	233,40*	0,05
V x C	0,29	17,80*	5,90*	17,17*	0,03
V x H	0,32	1,28	0,00	1,08	0,10
C x H	1,75	5,12*	6,25*	5,26*	0,91
V x C x H	0,24	34,90*	8,44*	34,04*	3,98
CV	12,41	19,82	23,83	20,07	8,77

* diferença significativa ($p \leq 0,05$)

Fonte: Autor (2025)

4.2.1 Dispersão

Para a variável dispersão os fatores velocidade e altura de voo apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. As interações entre os fatores de variação analisados velocidade, altura de voo e volume de calda não afetaram significativamente a dispersão das gotas.

O coeficiente de dispersão representa a variação do tamanho das gotas, quanto maior o coeficiente mais heterogêneo serão os diâmetros. Analisando os resultados obtidos verificamos que a dispersão variou de 0,69 a 0,88 o que sugere um espectro de gotas menos heterogêneo.

O maior valor de dispersão de gotas, 0,88 foi observado para a velocidade de V1 (5,0 m.s⁻¹) na altura de H1 (3,0 m) com volume de calda de C1 (40 L.ha⁻¹), como pode ser verificado na Tabela 3 (Figura 3). Este não apresentou diferença estatística significativa para os demais tratamentos para essa mesma velocidade com exceção V1H1C2. Pereira (2023) determinou que a maior dispersão de produto foi observada na velocidade de 15 km h⁻¹ não diferindo estatisticamente da velocidade de 25 km h⁻¹. As propriedades físico-químicas da calda de pulverização desempenham um papel importante na determinação do tamanho das gotas, o que pode levar a diferentes valores de dispersão.

Analisando os valores de dispersão, o resultado mais próximo de zero (0,69), que indica maior homogeneidade dos diâmetros de gota foram observados para a maior altura de voo ($H_2 = 5,0$ m).

O aumento da altura de voo e velocidade resultaram em uma redução da dispersão das gotas (Tabela 4). Esse fato pode ser justificado uma vez que aumentando a altura de voo e a velocidade o turbilhonamento do fluxo de ar descendente causado pelas hélices do drone ser menor quando comparado com a altura de 3,0 m. A dispersão das gotas sofre influência das propriedades físico-químicas da calda utilizada na aplicação e tem papel fundamental na determinação do tamanho das gotas.

Tabela 3. Teste de média para a variável dispersão em função dos tratamentos para aplicação aérea

Tratamentos	Dispersão
V1h1c1	0,88 a
V1h1c2	0,82 ab
V1h2c1	0,75 ab
V1h2c2	0,74 b
V2h1c1	0,81 ab
V2h1c2	0,76 ab
V2h2c1	0,69 b
V2h2c2	0,72 b
Média geral	0,77
Dms	0,13
Cv (%)	12,41

* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 13. Teste de Tukey para fator de dispersão das gotas em função dos tratamentos

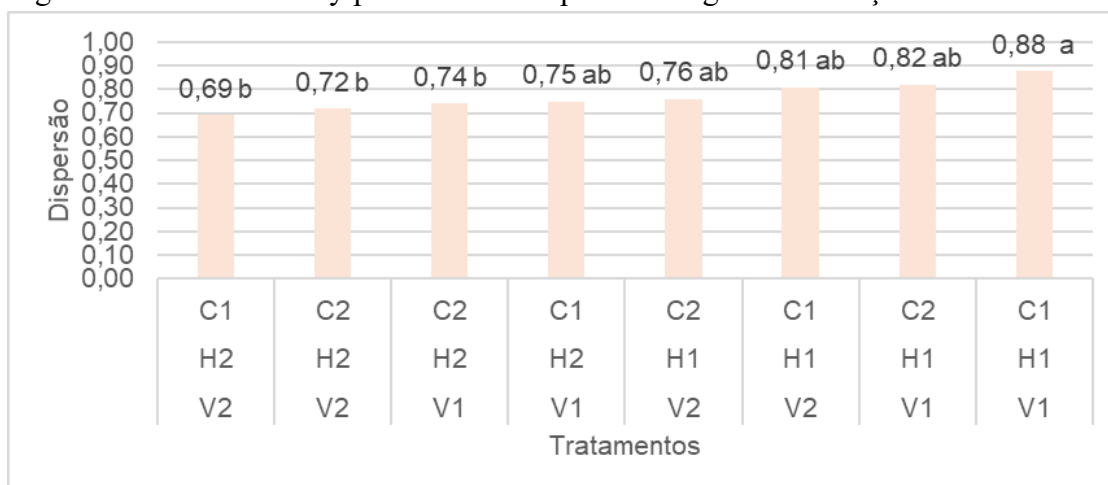


Tabela 4. Teste de média para a velocidade e altura de voo

Fator de variação	Dispersão	Fator de variação	Dispersão
V1	0,80 a	H1	0,82 a
V2	0,75 b	H2	0,73 b

* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.2.2 Volume de calda

O volume de calda aplicado apresentou diferença estatística significativa para a altura de voo e a interação entre os fatores velocidade, altura de voo e volume de calda programado afetaram significativamente o volume de calda aplicado como pode ser verificado na Tabela 2. Observa-se que os maiores volumes de calda aplicado ocorreram da altura de voo H1 (3,0 m). Mito provavelmente isso ocorreu em virtude da menor deriva sofrida pelas gotas nessa condição.

Tabela 5. Teste de Tukey para a variável volume de calda aplicado

Tratamentos	Volume de calda (L.ha ⁻¹)
V1H1C1	77,61 b
V1H1C2	81,88 b
V1H2C1	49,27 cd
V1H2C2	33,77 d
V2H1C1	109,36 a
V2H1C2	58,66 b
V2H2C1	42,82 cd
V2H2C2	36,48 d
Média geral	61,24
DMS	17,02
CV (%)	19,82

Fonte: Autor (2025)

O volume de calda apresentou diferença significativa para a interação entre os fatores velocidade e altura de voo e volume de calda programado. O maior volume de calda aplicado foi verificado para a velocidade de 10,0 m.s⁻¹ (V2) na altura de H1 (3,0 m)

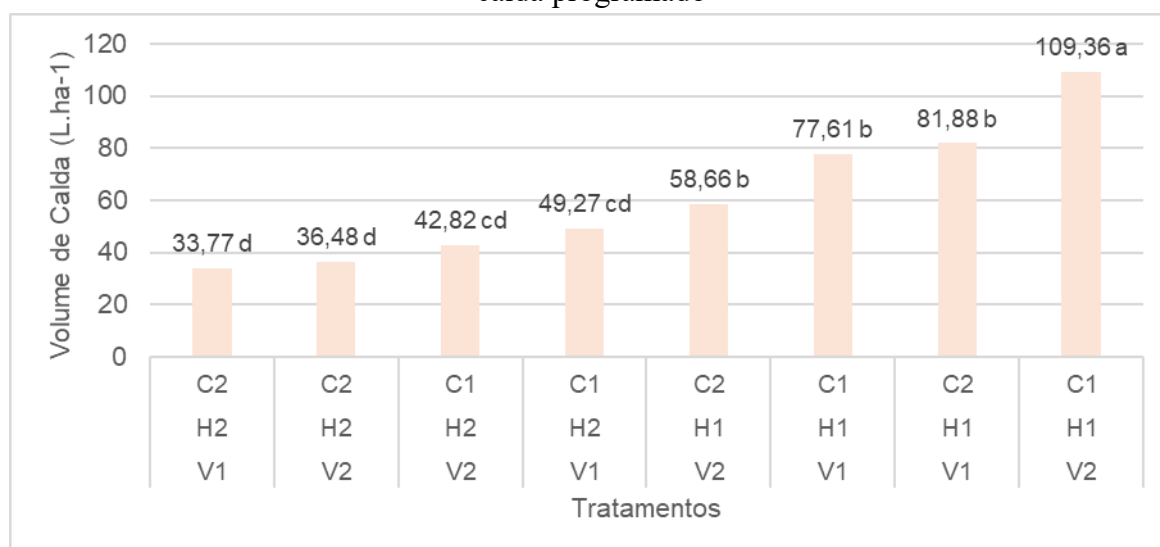
Tabela 6. Análise do desdobramento de velocidade dentro de cada nível de volume de calda e altura de voo

Velocidade	Volume de calda (l.ha ⁻¹)			
	C1		C2	
	H1	H2	H1	H2
V1	77,61 b	49,28 a	81,8 a	33,77 a
V2	109,27 a	42,83 a	58,67 b	36,49 a

* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os menores volumes de calda aplicados foram verificados para a altura de H2 (5,0 m) independente da velocidade e volume de calda programado com pode ser verificado na Figura 3. Esse comportamento pode ser explicado em função da maior altura proporcionar uma maior deriva das gotas.

Figura 14. Volume de calda aplicado em função da velocidade de e altura de voo e volume de calda programado



Fonte: Autor (2025)

O volume de calda aplicado apresentou interação significativa para a velocidade de voo e volume de calda programado (Tabela 6), sendo os maiores valores verificados para o volume de calda programado C1 (20 L.ha⁻¹)

Tabela 7. Análise do desdobramento da velocidade de voo e volume de calda aplicado para a variável volume de calda programado

Velocidade	Volume de calda (L.ha ⁻¹)	
	C1	C2
V1	63,44 b	57,83 a
V2	76,10 a	47,58 b

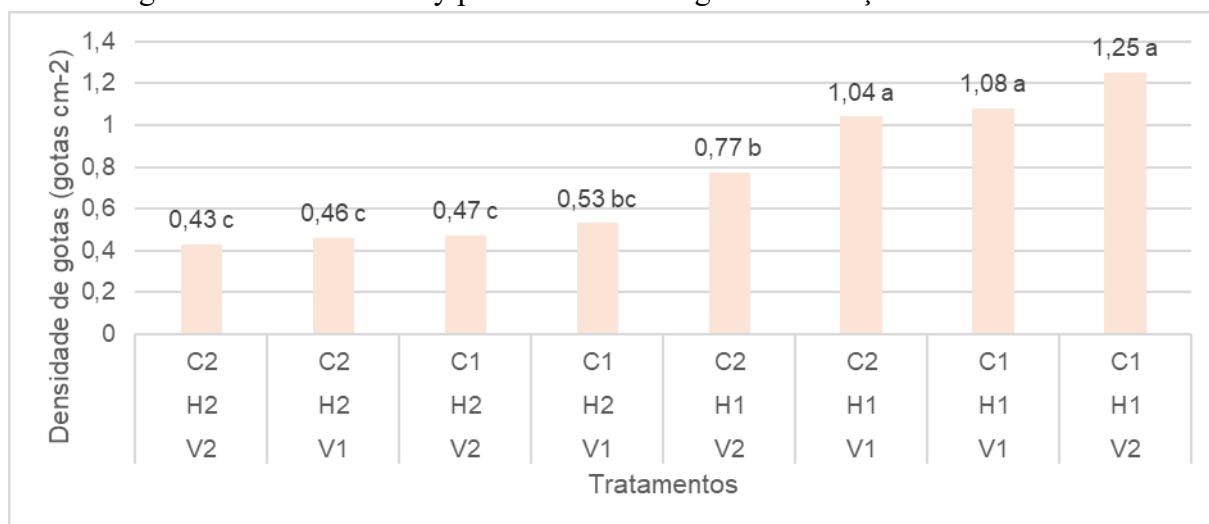
* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

4.2.3 Densidade de gotas

A densidade de gotas é um dos principais indicadores de qualidade da pulverização, pois está diretamente relacionada à cobertura, ao potencial de controle e à eficiência da aplicação. Os tratamentos V2H1C1, V1H1C1 e V1H1C1 apresentaram os maiores valores de densidade de gotas diferindo estatisticamente dos demais tratamentos (Figura 4). A altura mais baixa e a menor velocidade favoreceram o aumento da densidade de gotas,

provavelmente reduzido à deriva e aumentando assim a quantidade de produto depositado no alvo. Os resultados mostram que a menor altura de voo proporciona sempre densidades de gotas mais altas. No estudo de Ruppenthal *et al.* (2024), realizado na cultura do milho o aumento da altitude resultou em uma leve redução na quantidade de gotas por centímetro quadrado em cada papel hidrossensível (PHS), resultado semelhante ao verificado no presente estudo.

Figura 15. Teste de Tukey para densidade de gotas em função dos tratamentos



Fonte: Autor (2025)

4.2.4 Percentual de cobertura

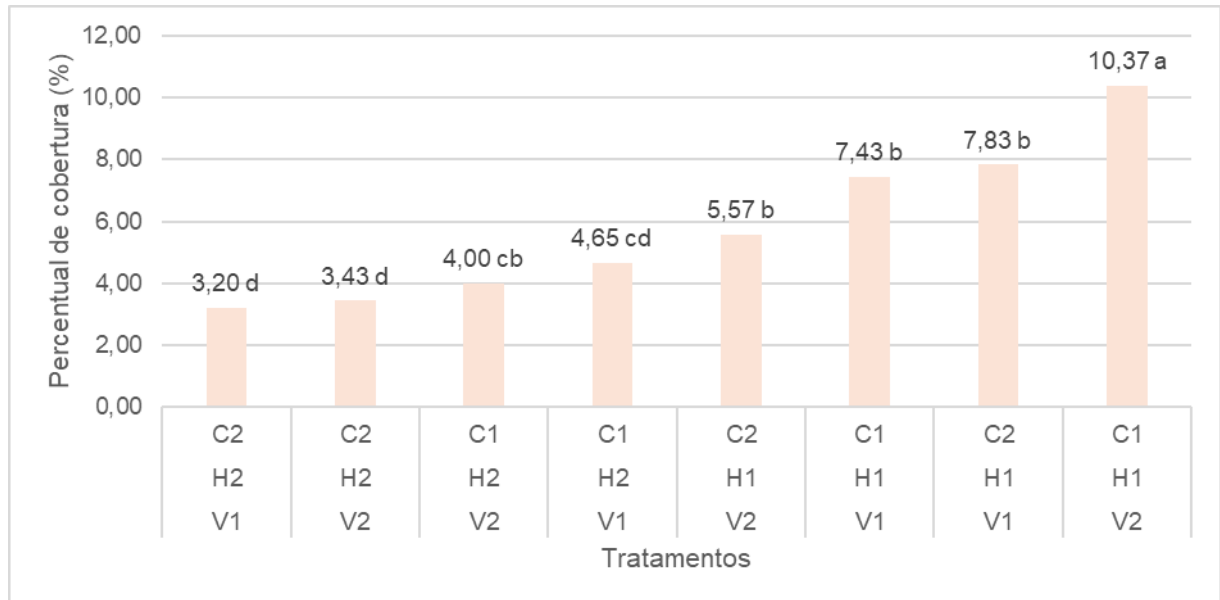
O percentual de cobertura representa a proporção da superfície alvo recoberta pelas gotas da pulverização representando um bom indicador da qualidade da deposição das gotas. O melhor desempenho de cobertura foi verificado para o tratamento V2H1C1, 10,37%, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Esse resultado pode ser explicado porque na maior velocidade ocorre uma maior turbulência sob o drone o que ajuda a melhorar a dispersão das gotas sobre o alvo, na menor altura o tempo de queda é menor reduzindo a deriva e o maior volume de calda programado favorece para um maior número de gotas, consequentemente um maior recobrimento do alvo.

Analisando o incremento de altitude para taxas de aplicação fixas, em geral, a área coberta diminui conforme o drone voa mais alto, fato também encontrado por Woldt *et al.* (2018) nos dois modelos de drone analisados. Já Lou *et al.* (2018) obtiveram um aumento da cobertura com aumento da altitude de voo de 1,5 para 2 metros, enquanto Cunha e Silva (2023) não encontraram diferença de cobertura entre altitudes de 1,5 e 3 metros.

Os menores valores de cobertura foram observados para a altura H2, corroborando os valores encontrados por Ruppenthal (2024), que encontrou menor densidade de gotas para maior altura (6,0 m) e menor volume de calda aplicado (10 L ha⁻¹). Isso é explicado por que na maior altura de voo ocorre um aumento no tempo de queda da gota contribuindo para um aumento da deriva. Para a altura de voo H1 (3,0 m) o percentual de cobertura variou entre 5,60 e 10,4 % e para a altura H2 (5,0 m) variou entre 3,2 e 4,6%. O efeito do volume de calda é perceptível, porém depende dos demais fatores estudados. A maior velocidade melhora a

turbulência e a cobertura, mas só apresentou bons resultados na menor altura de voo. A maior quantidade de calda aplicada tende a aumentar a cobertura, principalmente em maiores alturas de voo.

Figura 16. Teste de Tukey para percentual de cobertura em função dos tratamentos



Fonte: Autor (2025)

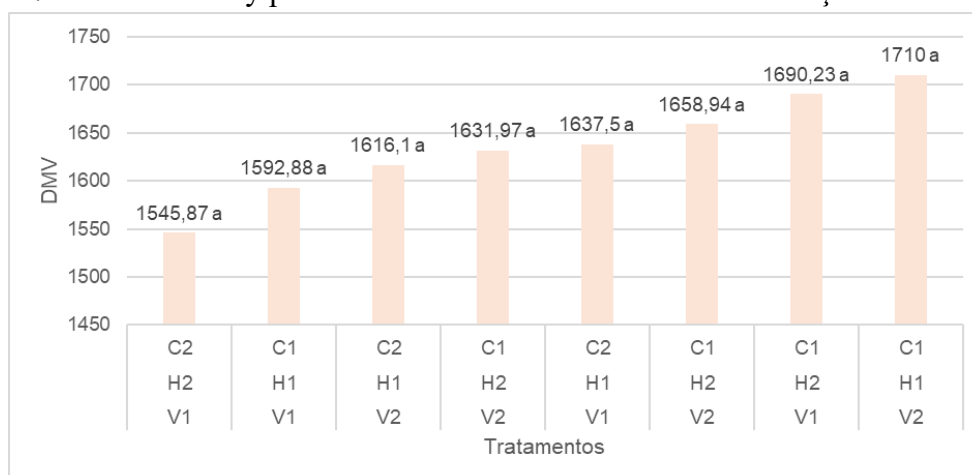
4.2.5 Diâmetro médio volumétrico (DMV)

O diâmetro médio volumétrico refere-se ao diâmetro no qual a massa das gotas é dividida em duas partes iguais de volume, como a soma do volume das gotas maiores igual à soma das gotas menores.

Os fatores de variação velocidade e altura de voo e volume de calda programado não afetaram significativamente o DMV, resultados semelhantes foram obtidos por Lucini (2022), em que a altura de voo de 3,0 m não interferiu no DMV. Esse fato é explicado uma vez que o drone foi programada para um mesmo diâmetro de gotas em todos os tratamentos.

Mesmo não apresentando diferença estatística significativa verifica-se que o aumento tende a aumentar o DMV. Ruppenthal (2024) afirma que alturas maiores aumentam o DMV do espectro, tendo influência direta da evaporação das gotas mais finas durante o percurso, deve-se atentar ao trabalhar com alturas de voo elevadas.

Figura 17. Teste de Tukey para o diâmetro médio volumétrico em função dos tratamentos



Fonte: Autor (2025)

4.3 Comparação drone e pulverizador tratorizado

A comparação entre a aeronave remotamente pilotada (ARP) e o pulverizador tratorizado evidenciou diferenças estatísticas significativas para o número de gotas, fator de dispersão, volume de calda aplicado, densidade de gotas, percentual de cobertura e DMV, demonstrando que os dois sistemas apresentam características operacionais distintas, capazes de influenciar diretamente a eficiência da aplicação de produtos fitossanitários.

4.3.1 Número de gotas

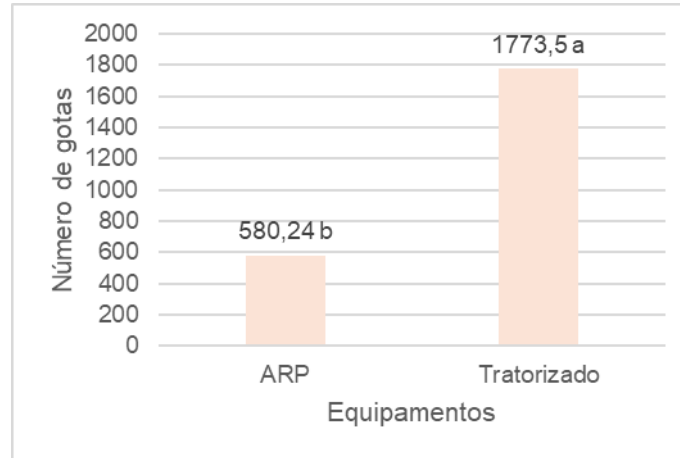
A avaliação do número de gota depositadas é essencial para compreender a eficiência de diferentes tecnologias de aplicação. Na Figura 18 são apresentados os valores médios do número de gotas produzido por cada equipamento em função dos tratamentos. As médias foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade, e médias com letras distintas diferem estatisticamente entre si.

Observa-se que o pulverizador tratorizado apresentou diferença estatisticamente significativa (1773,50) quando comparado com o ARP (580,24) gotas depositadas no papel hidrossensível. O pulverizador tratorizado depositou cerca de três vezes mais gotas que o ARP na mesma superfície. Esse comportamento pode estar associado às características operacionais do pulverizador tratorizado que trabalha com volume de calda maior, pontas de pulverização que trabalham com vazões e pressões maiores, resultando em uma maior formação de gotas.

Por outro, a aplicação via ARP opera com menores volumes de calda e com diâmetro de gotas menores. O fluxo de ar descendente gerado pelas asas rotativas influencia positiva ou negativamente o deslocamento das gotas dependendo da altura e velocidade de voo. Como vantagem, a aplicação com ARP não causa amassamento da cultura, apresenta elevada precisão na aplicação, capacidade de operação em áreas de difícil acesso e maior segurança do operador. Tafernaberrri Junior (2023) Avaliou o número de gotas que atingiram os cartões hidrossensíveis, onde foi possível identificar uma grande variação entre as amostras, com média geral de 97,07 gotas, número mínimo de 12,33 gotas e máximo de 573,33 gotas,

contudo não apresentou diferença estatística significativa, em relação à altura e a velocidade de voo.

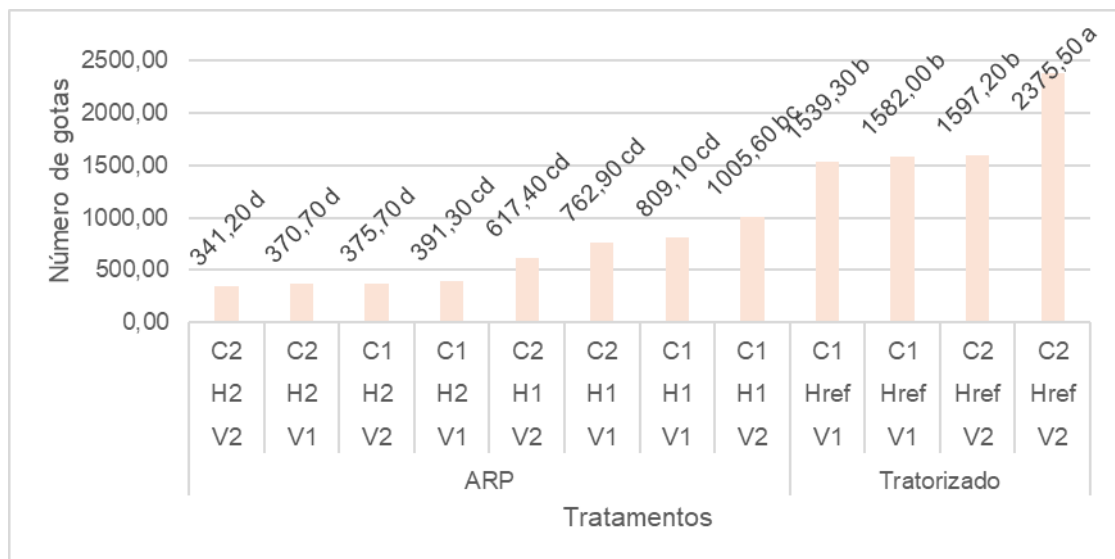
Figura 18. Teste de Tukey para o número de gotas em função do equipamento utilizado



Fonte: Autor (2025)

Analisado os dados da Figura 19 observamos que o menor número de gotas ocorreu para a maior altura de voo ($H_2 = 5,0$ m) do ARP. O aumento da altura de voo aumenta o tempo que a gota leva para atingir o alvo o reduz a vida útil da gota e favorece ao processo de exoderiva, onde as gotas de menor diâmetro são mais propensas a serem carregadas pelo vento. Em muitos intervalos durante a realização dos ensaios, a velocidade do vento estava acima do valor ideal, contribuindo para o aumento do carregamento das gotas.

Figura 19. Teste de Tukey para a variável dispersão na aplicação com ARP e pulverizador tratorizado.



Fonte: Autor (2025)

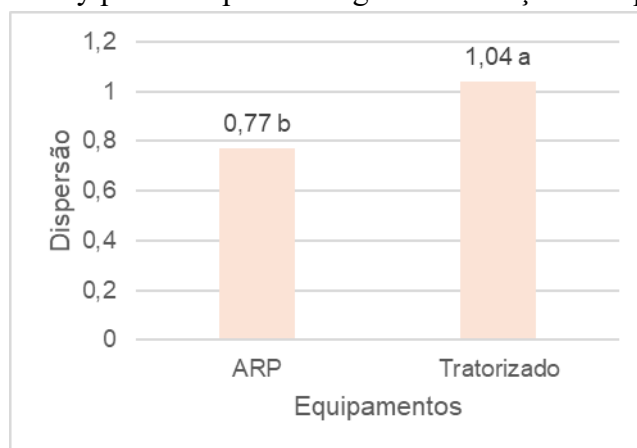
4.3.2 Fator de dispersão

A dispersão de gotas diferiu significativamente entre os equipamentos avaliados (Figura 20). Quanto mais próximo de zero mais homogêneo é o espectro de gotas. O fator de

dispersão para a ARP foi de 0,77 enquanto o pulverizador tratorizado registrou valor de 1,04, indicando que o espectro de gotas gerado pelo ARP foi mais uniforme. Esse resultado sugere que a pulverização via ARP produz gotas com menor variação de diâmetro quando comparado com o pulverizador tratorizado, conferindo maior homogeneidade na aplicação. A maior variação no espectro de gotas do pulverizador tratorizado é acarretado pelas variações de pressão da bomba hidráulica e a turbulência dentro da barra.

Pereira (2023) avaliando a deposição de calda em diferentes locais da planta de soja utilizando drone e pulverizador de barras verificou diferença significativa na dispersão de gotas entre os tratamentos, o mesmo observado por Machado e Reynado (2019), onde encontraram diferença significativa entre os métodos de aplicação, precisamente no caso da posição terço inferior, em que a aplicação aérea demonstrou menor variação no terço inferior em comparação com a aplicação terrestre.

Figura 20. Teste de Tukey para a dispersão de gotas em função do equipamento utilizado



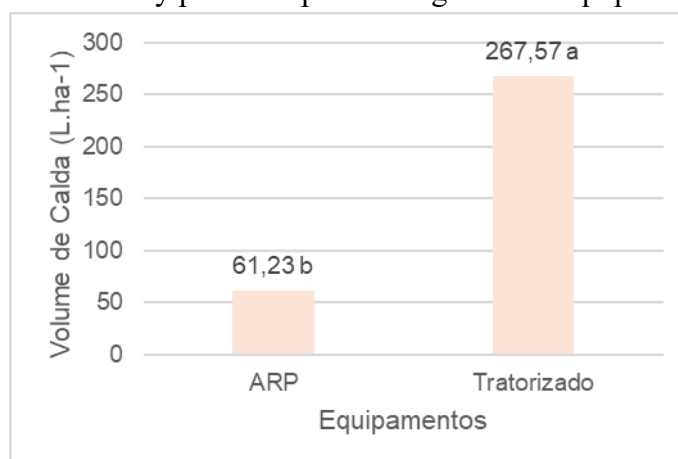
Fonte: Autor (2025)

4.3.3 Volume de calda aplicado

A comparação entre os sistemas de aplicação revelou diferenças estatísticas significativas no volume de calda aplicado. A ARP apresentou volume médio de 61,23 L.ha⁻¹, enquanto o pulverizador tratorizado 267,57 L.ha⁻¹ (Figura 21).

O menor volume observado na ARP é característico das operações aéreas de baixa taxa, que se baseiam na geração de gotas finas e na otimização da distribuição da calda por meio do deslocamento aerodinâmico produzido pelos rotores. O ARP foi programado para distribuir 20 e 40 L.ha⁻¹ enquanto o pulverizador tratorizado foi regulado para aplicar 120 e 250 L.ha⁻¹ de calda.

Figura 21. Teste de Tukey para a dispersão de gotas nos equipamentos utilizados



Fonte: Autor (2025)

4.3.4 Densidade de gotas e percentual de cobertura

A densidade de gotas e o percentual de cobertura apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os equipamentos avaliados. A aplicação realizada com a aeronave remotamente pilotada (ARP) resultou em densidade média de 0,76 gotas cm⁻² e percentual de cobertura de 5,81%, enquanto o pulverizador tratorizado apresentou valor significativamente superior, de 2,25 gotas cm⁻² e 40,17%, respectivamente.

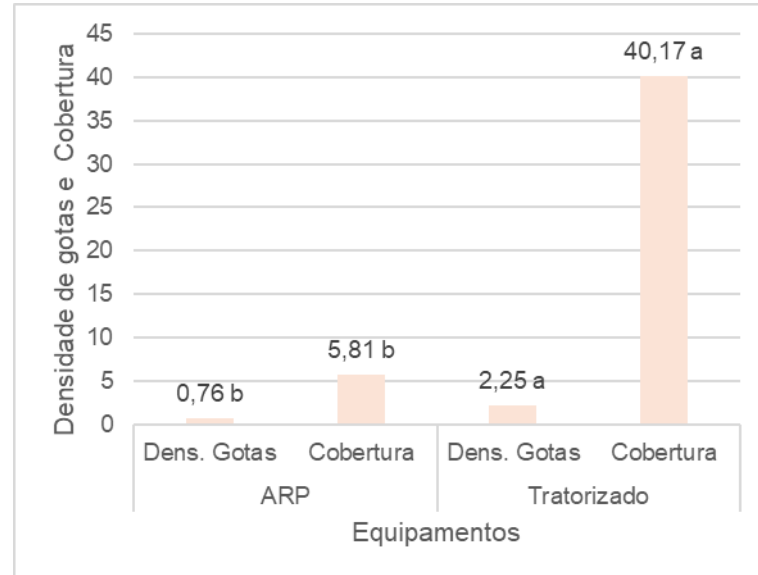
A menor densidade de gotas (0,76) e o reduzido percentual de cobertura (5,81) observados na ARP são compatíveis com o padrão operacional característico desse tipo de equipamento, que utiliza baixos volume de calda aplicado e gotas relativamente finas, resultando em menor deposição líquida por área. Embora o fluxo de ar descendente gerado pelos rotores favoreça o direcionamento das gotas ao alvo, o volume de calda limita a capacidade de formar filmes contínuos ou áreas amplamente molhadas na superfície foliar. Assim, a aplicação por ARP tende a priorizar a uniformidade espacial e a eficiência em baixa volume de aplicação, mais do que a maximização da cobertura superficial.

Por outro lado, o pulverizador tratorizado apresentou valores superiores de densidade de gotas (2,25), resultados semelhantes foram obtidos por Sandmann et al (2025) obteve resultados que mostraram que a pulverização terrestre apresentou maior densidade de gotas em todas as posições avaliadas e percentual de cobertura (40,17), resultado do maior volume de calda aplicado, 267,57 L ha⁻¹ (Figura 21) e da pulverização gerada por pontas hidráulicas de maior vazão. Isso favorece a formação de grande número de gotas, 1773,50 para o pulverizador tratorizado (Figura 18) aumentando a área molhada, o que explica a cobertura sete vezes maior em comparação à ARP. Tais características tornam o sistema tratorizado mais eficiente em aplicações que exigem elevada deposição superficial, penetração no dossel ou maior persistência da calda nas folhas.

A aplicação com ARP, operando com baixo volume de calda, apresentou menor densidade (Figura 23) e percentual de cobertura, características esperadas em sistemas de aplicação aérea em baixa vazão. O mecanismo aerodinâmico gerado pelos rotores favorece a deposição direcionada e a uniformidade espacial, mas não proporciona densidade elevada de gotas por área, principalmente devido ao reduzido volume de calda aplicado. Isso contribui

para a baixa cobertura observada (5,81%), embora a menor dispersão (0,77) indique uma distribuição mais homogênea das gotas depositadas

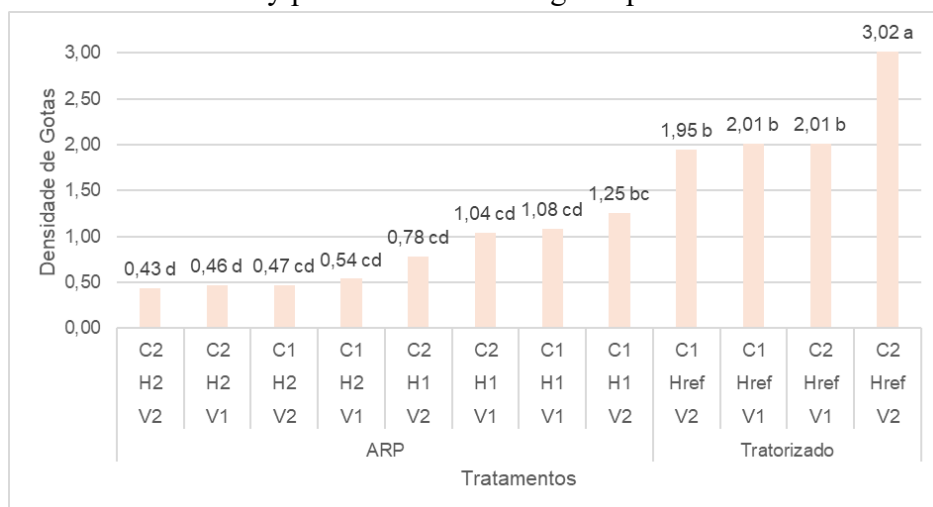
Figura 22. Teste de Tukey para a densidade de gotas gerado pelos equipamentos utilizados



Fonte: Autor (2025)

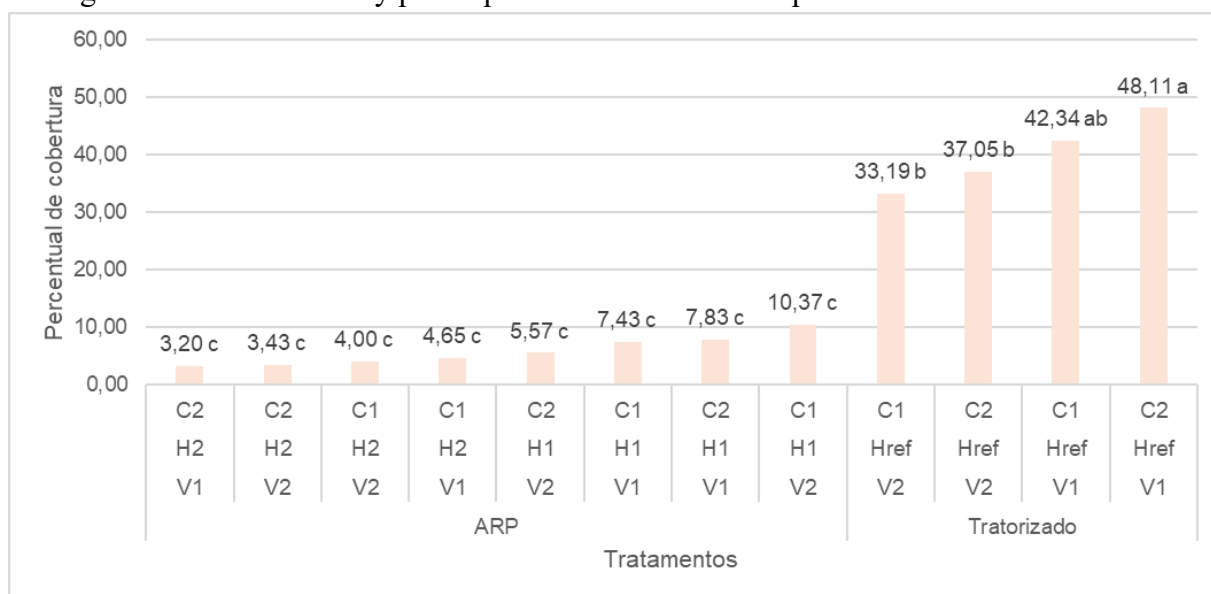
A densidade de gotas e o percentual de cobertura apresentam comportamentos similares em relação às variáveis analisadas. Observa-se para a densidade de gotas (Figura 23) e percentual de cobertura (figura 24) que os menores valores para o ARP ocorrem na maior altura de voo ($H_2 = 5,0$). Para o pulverizador tratorizado a maior densidade de gotas (3,02) ocorreu para a maior velocidade e maior volume de calda aplicado diferindo significativamente dos demais tratamentos com o mesmo equipamento. Os maiores percentuais de cobertura para a aplicação tratorizado (Figura 24) ocorreram na menor velocidade deslocamento do conjunto ($4,04 \text{ km.h}^{-1}$).

Figura 23. Teste de Tukey para a densidade de gotas para os tratamentos utilizados



Fonte: Autor (2025)

Figura 24. Teste de Tukey para a percentual de cobertura para os tratamentos utilizados



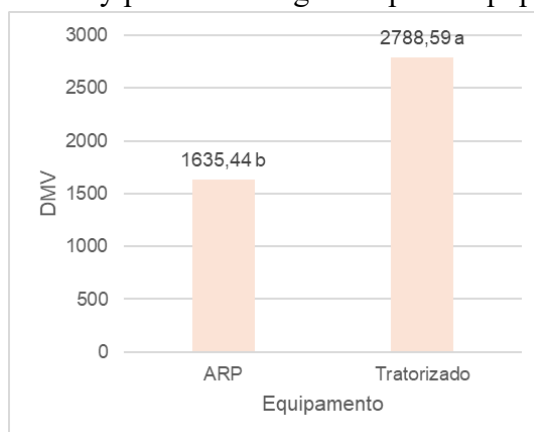
Fonte: Autor (2025)

4.3.5 Diâmetro médio volumétrico

Os resultados obtidos para o diâmetro médio volumétrico (DMV) indicam diferenças significativas entre os dois equipamentos avaliados (Figura 25). O pulverizador tratorizado apresentou maior densidade de gotas (2,25 gotas cm^{-2}) (Figura 22) e maior DMV (2788,59 μm), enquanto a aeronave remotamente pilotada (ARP) resultou em menor densidade (0,76 gotas cm^{-2}) e menor DMV (1635,44 μm).

A maior densidade de gotas observada para o pulverizador tratorizado está associada à maior vazão, proximidade do alvo e ao padrão de distribuição típico de barras de pulverização, favorecendo maior deposição por unidade de área.

Figura 25. Teste de Tukey para o DMV gerado pelos equipamentos utilizados

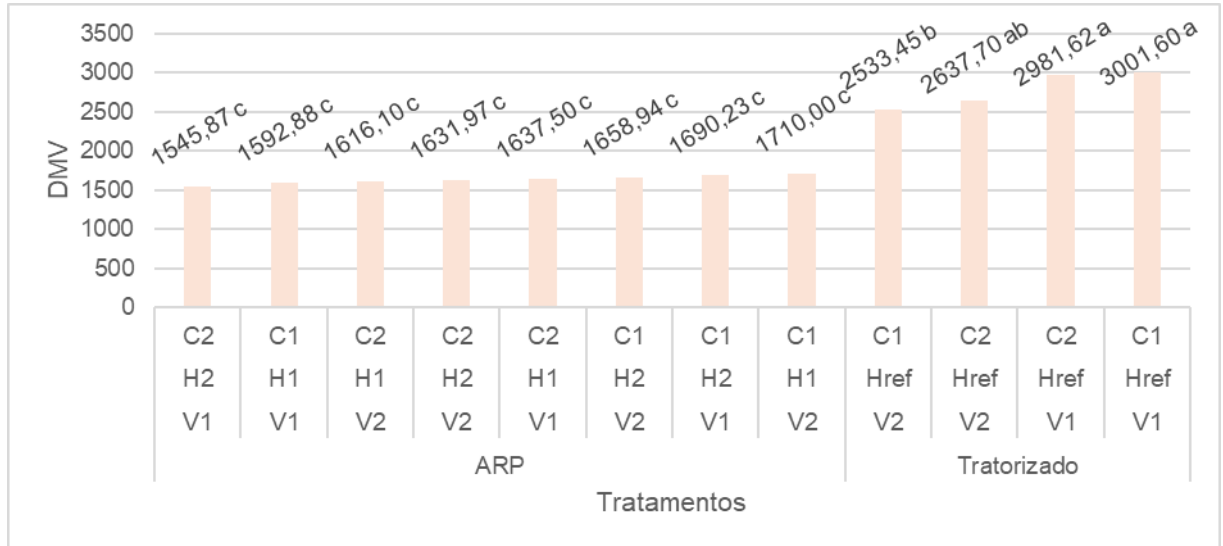


Fonte: Autor (2025)

Comparando os valores do DMV para os tratamentos aplicados (Figura 26) constata-se que o ARP gera um espectro de gotas mais homogêneo, não apresentando diferença estatística significativa para a aplicação com o ARP. A diferença percentual entre o maior e menor valor

do DMV foi de 10,6% para o ARP e 18,5% para o pulverizador tratorizado. Na menor velocidade de deslocamento do conjunto tratorizado ocorreu os maiores valores de DMV.

Figura 26. Teste de Tukey para o DMV para os tratamentos utilizados



Fonte: Autor (2025)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ARP, operando com baixa taxa volumétrica, apresentou menor número de gotas, menor densidade e menor percentual de cobertura, características esperadas em sistemas de aplicação aérea em baixa vazão.

O pulverizador tratorizado, apresentou maior densidade de gotas, e cobertura superior (40,17%). O maior volume aplicado ($267,57 \text{ L ha}^{-1}$) contribuiu para esse comportamento.

A maior dispersão observada no pulverizador tratorizado sugere que, apesar da elevada deposição, o sistema apresenta maior variabilidade espacial no DMV, influenciada por fatores como turbulência gerada pelo deslocamento da máquina e oscilação do conjunto hidráulico. Já a ARP demonstrou maior uniformidade, mas com menor intensidade de deposição.

Os resultados demonstram diferenças significativas entre os sistemas de aplicação avaliados. O pulverizador tratorizado apresentou maior número de gotas, maior densidade, maior percentual de cobertura e maior volume de calda aplicado, caracterizando-se como tecnologia adequada para aplicações que exigem elevada deposição e cobertura foliar.

A aeronave remotamente pilotada, embora apresente menor deposição e cobertura, destacou-se pela maior uniformidade da distribuição das gotas e pelo baixo volume de aplicação, representando uma alternativa viável em áreas de difícil acesso com declividade acentuada ou em culturas com estádios avançados, evitando o amassamento.

REFERÊNCIAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil, 2021. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial RBAC-E nº 94**. 26 p.

ANAC. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC-E Nº 94 EMENDA Nº 03**. Agência Nacional de Aviação Civil ANAC, 2024.

ANTUNIASSI, U. R., CARVALHO, F. K., MOTA, A. A. B., CHECHETTO, R. G. **Entendendo a tecnologia de aplicação**. Botucatu: FEPAF, 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL. **Manual de tecnologia de aplicação**. São Paulo: ANDEF, 2013.

BENASSI, B. J. P. M.; PEREIRA, G. C.; ALMEIDA, G. R. R.; DA CUNHA, L. T. **Influência da velocidade na pulverização foliar de produtos fitossanitários no cafeeiro**. Revista Agroveterinária do Sul de Minas - ISSN: 2674-9661, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 10–20, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unis.edu.br/agrovetsulminas/article/view/354>. Acesso em: 11 dez. 2025.

BOLLER, W. **Avanços tecnológicos em pontas de pulverização**. Cuiabá, Mt: V SINTAG - Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação, 2011. 19 p.

CARLESSO, J. A; BARIVIERA, R. **Avaliação da qualidade de pulverização com drones, utilizando diferentes vazões, velocidades e faixa de aplicação**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, São Miguel do Oeste, SC, 2022.

Chaim A, Neto JC, Gattaz NC, Visoli MC (2000) **Gotas Programa de análise de deposição de agrotóxicos: Manual de utilização**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

CHAIM, A.; NETO, C.; PESSOA,. **Uso do programa computacional Gotas para avaliação da deposição de pulverização aérea sob diferentes condições climáticas**. Embrapa.br, 16 out. 2017.

CUNHA, J. P. A. R ; SILVA, M. R. A . **Spray deposition from a remotely piloted aircraft on the corn crop**. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 54, n. 1, p. 1-8, 2023.

CUNHA, J. P. A. R.; SILVA, M. R. A. **Spray deposition from a remotely piloted aircraft on the corn crop**. Revista Ciência Agronômica, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 1-8, fev. 2023. GN1 Sistemas e Publicações Ltda. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20230027>.

DI PRINZIO, A.; BEHMER, S.; MAGDALENA, J.; CHERSICLA, G. **Effect of Pressure on the Quality of Pesticide Application in Orchards**. J Chilean journal of agricultural research. 70, p. 674-678, 2010.

Diário Oficial da União. Publicado em: 24/09/2021, Edição 182, Seção 1, Página 14. **PORTARIA MAPA Nº 298, DE 22 DE SETEMBRO DE 2021.**

Dierings CA (2020) **Impacto da velocidade de aplicação na distribuição de gotas em diferentes sistemas de pulverização na cultura da soja (Glycine max L.)**. Trabalho de conclusão de curso em Agronomia, Instituto Federal Goiano – Campus Urutái.

Drones are viable option for farmers and service providers in Brazil. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/101800672/drones-are-viable-option-for-farmers-and-service-providers-in-brazil>. Acesso em: 3 set. 2025.

FARIAS, M. S. et al. **Crítérios técnicos para a seleção de pulverizadores autopropelidos comercializados no mercado brasileiro**. Ciência Rural, v. 45, n. 05, p. 939-942, 2015.

FERREIRA, D. F. **SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs**. Brazilian Journal of Biometrics, 37, n. 4, p. 529-535, 12/20 2019.

FRANCO, L. **Drones se multiplicam nos céus do agro brasileiro: número de aparelhos no campo cresce 375% em dois anos**. Globo Rural, 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2024/05/07/drones-se-multiplicam-nos-ceus-do-agro-brasileiro-numero-de-aparelhos-no-campo-cresce-375percent-em-dois-anos.ghml>.

HEIDARY, M.; DOUZALS, J. P.; SINFORT, C.; VALLET, A. **Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review**. Crop Protection, Guildford, v.63, p.120-130, 2014.

Hilz, E.; Vermeer, A. W. P. **Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction**. Crop Protection, v.44, p.75-83, 2013.

JACTO. **Pulverizador agrícola: tudo o que você precisa saber**. Disponível em: <<https://blog.jacto.com.br/pulverizador-agricola-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>>.

JESUS, R. M. **Pontas de pulverização e velocidade de deslocamento no controle químico de chrysodeixis includens na soja**. Ifgoiano.edu.br, 2016.

LIU, Q.; COOPER, S.E.; QI, L.; Fu, Z. **Experimental study of droplet transport time between nozzles and target**. Biosystems Engineering, v.95, p.151-157, 2006.

LOU, Z.; XIN, F.; HAN, X.; LAN, Y.; DUAN, T.; FU, W.. **Effect of Unmanned Aerial Vehicle Flight Height on Droplet Distribution, Drift and Control of Cotton Aphids and**

Spider Mites. Agronomy, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 187, 13 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy8090187>.

LUCINI, N. **Deposição de gotas em função da altura de voo de um arp pulverizador e da resolução de escaneamento dos papeis hidrossensíveis.** Trabalho de conclusão de curso apresentado Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

MACHADO, T.; REYNALDO, ÉTORE F. **Comparação do uso de aplicação aérea e terrestre na qualidade de deposição de produto na cultura da soja.** Enciclopedia Biosfera, v.16, n.29, 2019.

Mapa regulamenta o uso de drones em atividades agropecuárias. GOVBR, 2002. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-regulamenta-o-uso-de-drones-em-atividades-agropecuarias>

MEWES, W. L. C.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZANUNCIO, J. C.; ALVARENGA, C. B. **Aplicação de agrotóxicos em eucalipto utilizando Pulverizador pneumático.** Revista Árvore, v. 37, p. 347-353, 2013.

MONIZ, A. **Cobertura das folhas de soja utilizando diferentes pontas de pulverização.** 2020.

NACIONAL, I. **PORTARIA MAPA Nº 298, DE 22 DE SETEMBRO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional.** Disponível em: <<https://in.gov.br/web/dou/-/portaria-mapa-n-298-de-22-de-setembro-de-2021-347039095>>.

NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; BAETENS, K.; SONCK, B. **The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers.** Transactions of the ASABE, v.50, p.1129-1140, 2007.

NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; BAETENS, K.; VERBOVEN, P. **Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 2: Spray application technique.** Asp Appl Biol, 77, p. 331-339, 01/01 2006.

PEREIRA, C. et al. **Eficiência da aplicação com uso de drone e pulverizador terrestre.** 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PEREIRA, V. C. et al. **Influência dos eventos de El Nino e La Nina na precipitação pluviométrica de Mossoró-RN.** Enciclopédia Biosfera. Centro Científico Conhecer, v. 7, p. 1-13, 2011

PERES, A. J. A.; RAETANO, C. G.; BAIIO, F. H. R.; NEVES, D. C. **Pulverização em taxa variada na cultura do algodão.** ENERGIA NA AGRICULTURA, 35, n. 1, p. 18-28, 03/20 2020.

PERES, A. J. A. **Volume de aplicação na qualidade da deposição da pulverização na cultura do algodoeiro.** [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 14 fev. 2014.

SPINACÉ, P. S. et al. **Uniformidade de distribuição de líquido de pontas de pulverização hidráulica em mesa padronizada.** In: XV Jornada Científica. 2023.

RUPPENTHAL, J. G.. **Eficiência na deposição de gotas com uso de drone pulverizador em diferentes alturas de voo e taxas de aplicação na cultura do milho (Zea mays).** 2024. Dissertação (Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024

SANDMANN, A. et al. **Comparação da Eficiência de Pulverização Agrícola: Drones versus Pulverizadores Terrestres.** Revista de Gestão e Secretariado, v. 16, n. 11, p. e5432-e5432, 2025.

SCHLOSSER, J. F. **Tecnologia de aplicação e máquinas de uso de agroquímicos.** Santa Maria. 2002. 21p. (Série técnica).

TAFERNABERRI JUNIOR, V. **Avaliação da pulverização com drone em diferentes alturas e velocidades de voo.** 2023.

WOLDT, W.; MARTIN, D.; LAHTEEF, M.; KRUGER, G.; WRIGHT, R.; MCMECHAN, J.; PROCTOR, C.; JACKSON-ZIEMS, T. **Evaluation of Commercially Available Small Unmanned Aircraft Crop Spray Systems.** 2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018, American Society of Agricultural and Biological Engineers. [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-15, ago. 2018. <http://dx.doi.org/10.13031/aim.201801143>.